

## **ВОЗМОЖНОСТИ НАЗЕМНОГО РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО НЕКОНТРОЛИРУЕМЫМ ИЗЛУЧЕНИЯМ**

С.В. Козелков, А.Н. Явтушенко, С.Д. Ставицкий  
(Национальная академия обороны Украины, Киев)

*Представлен анализ проведения идентификации космических аппаратов по неконтролируемым излучениям (НКИ) гетеродинов приемного тракта и задающих генераторов бортовой аппаратуры космических аппаратов.*

*космический аппарат, неконтролируемое излучение, приемный тракт*

**Введение.** Расширение знаний по развитию одного из основных видов космической деятельности, а именно идентификации космических аппаратов (КА) наземными радиотехническими системами является актуальной задачей, реализация которой проводится в рамках Национальной (Государственной) космической программы Украины на 2003 – 2007 гг.

Под идентификацией КА (в полете) понимается процесс, устанавливающий соответствие распознаваемого КА своему образцу, а именно данным об этом КА, имеющимся в центре обработки информации.

**Анализ литературы.** Как показал анализ [1 – 4] для идентификации КА целесообразно использовать результаты постоянно функционирующих блоков бортовой аппаратуры (ББА) КА, выбрав их характеристиками неконтролируемые излучения (НКИ), так называемые “просачивающиеся” через антенные системы КА. В частности, в качестве таких блоков могут использоваться гетеродины и задающие генераторы приемного тракта радиотехнического комплекса (РТК) КА.

Проведение идентификации космических аппаратов по НКИ гетеродинов приемного тракта и задающих генераторов подразумевает измерение характера изменения параметров колебаний гетеродинов и выделяет признаки, отличающие колебания одного генератора от другого. Поскольку НКИ гетеродинов является гармоническими колебаниями, то параметрами данных сигналов является амплитуда, частота и начальная фаза. Использование для целей идентификации амплитуды сигнала и начальной фазы не представляется возможным, так как на данные параметры сильно влияет среда распространения. Наиболее информативной для целей идентификации является частота колебания, а точнее, характер изменения частоты во времени. Такое изменение связано с нестабильностью частоты бортовых задающих генераторов

ров (ЗГ). Характер изменения частоты зависит от поэкземплярных особенностей каждого бортового генератора [1], что и является основой идентификации. При этом следует отметить, что процесс идентификации условно можно разделить на два этапа: первый этап связан с решением задачи обоснования моделей и алгоритмов обработки (оценивания), а также второй этап, предполагающий классификацию результатов обработки (оценивания).

**Целью данной статьи** является разработка и обоснование алгоритмов идентификации КА по НКИ аппаратуры бортового РТК.

**Математическая постановка задачи идентификации КА.** Условно источники нестабильностей частоты БРТК можно классифицировать по следующим, нижеперечисленным признакам [1, 3].

1. *Систематические изменения частоты*, вызываемые уходами или дрейфами. Эти изменения происходят за счет старения материала резонатора и являются чрезвычайно медленными. Их называют также “долговременной” нестабильностью, оценивают относительным изменением частоты в час, сутки, месяц или год в зависимости от типа устройства или характера применения.

2. *Детерминированные периодические отклонения частоты*, возникающие вследствие паразитной частотной модуляции сторонними процессами, например за счет нестабильности источников питания, наводок, изменения температуры, вибрации, давления и т.п.

3. *Изменения частоты за счет случайных флуктуаций*, обусловленные применением в аппаратуре электронных компонентов. Соответствующие флуктуации частоты называют “кратковременной” нестабильностью.

Процесс нестабильности, характеризуемый уходами фазы  $\varphi(t)$ , имеет вид [3]

$$\varphi(t) = g(t) + m(t) + n(t) . \quad (1)$$

Основным отличием слагаемого  $g(t)$  процесса (1) является его весьма медленное изменение на интервале наблюдения. Поэтому целесообразно считать его постоянным на этом интервале и не рассматривать в анализе моделей нестабильности. Составляющая  $m(t)$  процесса (1) – локально стационарный процесс с достаточно большим временем корреляции.

Компонента процесса  $n(t)$  процесса (1) описывает быстрые флуктуации изменений фазы во времени, наиболее информативные в плане выявления особенностей задающих генераторов. Более высокая информативность  $n(t)$  по сравнению с  $m(t)$  обусловлена наличием в компоненте  $m(t)$  соответствующих неизвестного доплеровского сдвига частоты. Наличие доплеровского сдвига часто приводит к невозможности идентификации генераторов по компоненте  $m(t)$ .

Практика исследования стационарных быстро флуктуирующих процессов, подобных  $n(t)$ , показывает высокую эффективность применения для их описания авторегрессионных моделей. Поэтому в дальнейшем

описание и анализ компоненты  $n(t)$  будет проводиться в терминах авторегрессионных моделей:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n a_i y(t-i) + e_1(t); \quad n(t) = e_1(t) + e_2(t), \quad (2)$$

где  $e_1(t) = \sum_{i=1}^n a_i n(t-i) + e_1(t)$  – порождающий шум;  $e_2(t) = e_1(t) - \sum_{i=1}^n a_i e_2(t)$  – белый шум измерений;  $y(t)$  – процесс изменения фазы колебания, вызванный слабо коррелированной компонентой нестабильности;  $a_i$  – коэффициенты авторегрессионной модели.

Используем соотношения (2) при

$$M[e_1(t)] = 0, E[e_1(t)e_1(s)] = G_1^2(t)\delta(t-1)$$

по изменениям фазы сигнала  $n(t)$  вида

$$n(t) = y(t) + e_2(t), \quad t = -p+1, \dots, 0, \dots, n, \quad (3)$$

где  $e_2(t)$  – случайный шум измерений.

Подставляя (2) в (3), получим регрессионное соотношение

$$n(t) = \sum_{i=1}^p a_i n(t-i) + e_1(t) - \sum_{i=1}^p a_i e_2(t-i) = N^T(t)a + e_1(t) + e_2(t) - v^T(t)a, \quad (4)$$

где  $N(t) = \{n(t-1), \dots, n(t-p)\}^T$ ;  $a = (a_1, \dots, a_p)^T$ ;  $v(t) = \{e_2(t-1), \dots, e_2(t-p)\}^T$ .

Задача оценивания параметров  $a_1, \dots, a_p$  на основе (4) является задачей регрессионного анализа переменных и сводится к определению оценки решения некорректного стохастического алгебраического уравнения, требующей специальной регуляризации. Непосредственное применение МНК допустимо только в частом случае, когда процесс  $e_2(t)$  удовлетворяет условию белого шума невязок [5]. Пусть выполнены условия:

1) процесс  $y(t)$  удовлетворяет *условию стационарности*, т.е. случайный процесс  $e_k(t)$ ,  $k = 1, 2$  удовлетворяет условиям:

$$M[e_k(t+1)/e_k(t), e_k(t-1), \dots] = 0; \quad M[e_k^2(t+1)/e_k(t), e_k(t-1), \dots] \leq k < \infty;$$

2) процессы  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$  *статистически независимы*.

Тогда из сделанных предположений следует конечность средних дисперсий

$$\bar{G}_k^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_k^2(i) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G e_k^2(i),$$

где  $G_k^2(i) = M[e_k^2(i)]$  – так называемая “текущая” дисперсия, а также эргодичность процессов  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$  по вторым моментам.

Определим оценку  $\hat{a}_n$  неизвестного параметра, а из условия минимума суммы взвешенных квадратов [5]:  $\hat{a}_n = \arg \min \omega^{-1}(a) \sum_{i=1}^n [n(i) - v^T(i)a]$ .

Такая оценка является сильно состоятельной, т.е.  $\hat{a}_n \rightarrow a$  при  $n \rightarrow \infty$ , и представляет собой модификацию обычной оценки МНК  $\hat{a}_n = [v^T v - \beta_n^* I]^{-1} v^T N$ , где  $v = \{v(1), \dots, v(n)\}^T$ ;  $N = (n_1, \dots, n_n)^T$ . При этом в качестве оптимального значения параметра регуляризации  $\beta_n^*$  выступает наименьший положительный корень уравнения

$$\Lambda_n(\beta_n) = N^T N - (1 - \mu) \beta_n^* - N^T N (N^T N - \beta_n^*)^{-1} N^T N = 0.$$

Доказано, что все корни этого уравнения неотрицательны и с вероятностью 1 при  $n \rightarrow \infty$  существует единственный корень  $\beta_n^*$ , принадлежащий промежутку  $[0, \lambda_{\min}]$ , где  $\lambda_{\min}$  – наименьшее собственное число матрицы  $Y^T Y$ . Для нахождения  $\beta_n^*$  обосновано применение метода Ньютона

$$\beta_n^*(k+1) = \beta_n^*(k) - \left\{ \Lambda_n \left[ \beta_n^*(k) \right] \right\} / \left[ \Lambda_n'(\beta_n^*(k)) \right]$$

с близким к 0 начальным значением  $\beta_n^*(0)$ , для которого  $\Lambda_n[\beta_n^*(0)] \leq 0$ . Результаты численных исследований показывают, что с ростом  $\mu$  (т.е. с увеличением дисперсии фоновый шума) оценки на основе классического МНК приобретают значительное и растущее смещение (до 80 % при  $\mu = 0,25$ ); в то время как свойства регуляризованных оценок ухудшаются достаточно медленно (смещение при  $\mu = 0,25$  не превосходит 4 – 5%).

Разработанная методика идентификации КА получила подтверждение при эксплуатации КА "Салют-7", "Астрон" и "Гранат". Для экспериментов были отведены 20 сеансов по КА "Астрон" и 5 сеансов по КА "Гранат".

Порядок измерения ухода частоты неконтролируемого излучения был следующим. Сигнал с выхода антенной установки поступал на входной усилитель высокой частоты (МШУ), и затем в гетеродинной части широкополосного приемника преобразовывался к частоте 10 МГц  $\pm$  5 Гц. Для преобразования входного сигнала сигнал промежуточной частоты с точностью  $\pm$  5 Гц проводились предварительные расчеты доплеровского сдвига частоты входного сигнала по предварительным целеуказаниям. Входной сигнал поступает на узкополосный приемник, проходит через один из десяти узкополосных кварцевых фильтров. По-

лоса пропускания каждого фильтра равна 1 Гц. Центральные частоты фильтров отличались на 1 Гц. Для обеспечения настройки фильтров с заданной точностью применялась достаточно сложная схема переноса сигнала  $10 \text{ МГц} \pm 5 \text{ Гц}$  на более низкие (до 500 ... 1000 Гц) частоты и последующего обратного преобразования на частоту 10 МГц. Значение частоты, равное 10 МГц, выбиралось, исходя из требований точности измерений нестабильности и возможностей аппаратуры.

**Выводы.** Экспериментальные исследования показали на высокую эффективность функционирования системы идентификации в составе единого РТК НАКУ КА. При этом разработанные метод и алгоритмы его реализующие идентификации космических аппаратов, в том числе алгоритмы робастного фильтра с конечной памятью и выбора оптимального размера “скользящего окна” для полиномиальной оценки состояний применялись в качестве программно-аппаратного комплекса идентификации космических объектов ближнего космоса “Салют-7”, среднего космоса “Астрон” и “Гранат”. Применение указанных результатов позволило расширить функциональные возможности РТК “Квант-Д” для решения задач контроля космического пространства и наземного пункта контроля работоспособности КА.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Кварцевые и квантовые меры частоты / Е.Н. Базаров, Н.А. Демидов, Е.Т. Жуков и др. Под ред. Б.И. Макаренко. – М.: МО СССР, 1989. – 536 с.*
2. *Козелков С.В., Стадченко В.Г., Нюкин Н.В., Шурыгин С.В. К вопросу о создании комплекса идентификации космических аппаратов // Информационные системы. – Х.: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 1998. – Вып. 3 (11). – С. 103 – 106.*
3. *Козелков С.В. Идентификация космических аппаратов по неконтролируемым излучениям // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2000. – Вып. 1 (7). – С. 169 – 172.*
4. *Козелков С.В. Математическая модель идентифицируемых процессов бортовой аппаратуры космического аппарата // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2000. – Вып. 2 (8). – С. 95 – 102.*
5. *Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложение / Пер. с англ. под. ред. А.М. Яглома, т.1. – М.: Мир, 1972. – 603 с.*

Поступила 4.02.2005

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор В.И. Карпенко,  
Харьковский университет Воздушных Сил.